

VŠB – Technická univerzita

Fakulta strojní

Katedra robototechniky

Konstrukční návrh kamerového subsystému s použitím
mikrokamery

The Construction Design of Camera Subsystem Using Micro
Cameras

Student:

Tomáš Hruška

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Ladislav Kárník, CSc.

Ostrava 2011

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě :.....

.....

Podpis

Prohlašuji, že

- jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, że Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было с́еднано, że s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- было с́еднано, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

Tomáš Hruška
Opavská 57
Bohuslavice 747 19

.....
Podpis

Anotace bakalářské práce

HRUŠKA, T. *Konstrukční návrh kamerového subsystému s použitím mikrokamery*, Ostrava: Katedra robotiky, Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011, 48 s. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Kárník, CSc.

Bakalářská práce se zabývá konstrukcí subsystému s použitím mikrokamery. Celý subsystém má čtyři stupně volnosti a je určen i pro venkovní prostředí. Pohyby jsou uskutečněny čtyřmi různými modelářskými servy. Snímání je uskutečněno předem zadanou miniaturní kamerou (MO-S691P), pro kterou byl celý tento subsystém konstrukčně navržen.

Annotation of Thesis

HRUŠKA, T. *The Construction Design of Camera Subsystem Using Micro Cameras*, Ostrava: Department of Robotics, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB – Technical University of Ostrava, 2011, 48 s. Thesis head: Ing. Ladislav Kárník, CSc.

The bachelor thesis describes the construction of the subsystem using microcamera. The entire subsystem has four degrees of freedom and is designed for outdoor environment. Moves are made by four different modeler servo motors. Scanning is carried out by pre-specified miniature camera (MO-S691P), for which the entire subsystem is designed and constructed.

Obsah:

| | |
|---|----|
| Seznam použitého označení..... | 6 |
| 1 Úvod | 9 |
| 2 Mikrokamery | 10 |
| 2.1 Druhy miniaturních kamer..... | 10 |
| 2.2 Použitá miniaturní kamera..... | 12 |
| 2.3 Použití mikrokamer..... | 12 |
| 3 Požadavkový list | 15 |
| 4 Varianty řešení | 16 |
| 4.1 Návrh variant:..... | 16 |
| 4.1.1 Varianta 1..... | 16 |
| 4.1.2 Varianta 2..... | 17 |
| 4.1.3 Varianta 3..... | 18 |
| 4.2 Hodnotová analýza..... | 19 |
| 5 Servo | 22 |
| 5.1 Řízení serva..... | 24 |
| 5.2 Hlavní parametry serva..... | 25 |
| 5.3 Použitá serva..... | 25 |
| 5.4 Přepočet parametrů modelářských serv..... | 26 |
| 5.4.1 Moment M_s – převod kroutícího momentu z $[kg \cdot cm]$ na $[N \cdot mm]$ | 26 |
| 5.4.2 Servo HS-50..... | 26 |
| 5.4.3 Servo HS-5085MG..... | 26 |
| 5.4.4 Servo HS-805MG..... | 27 |
| 6 Konstrukční řešení optimální varianty | 28 |
| 6.1 Konstrukce kloubů ramen (1. a 2. stupeň volnosti)..... | 29 |
| 6.2 Konstrukce uchycení mikrokamery..... | 29 |
| 6.3 Konstrukce základny..... | 30 |
| 6.4 Konstrukce ramen..... | 31 |
| 6.5 Pohyblivé držáky kamery, jistící sponka..... | 31 |

| | | |
|-------|---|-----------|
| 6.6 | Držák serva | 32 |
| 6.7 | Krytování serv..... | 32 |
| 6.8 | Upevnění subsystému | 32 |
| 6.9 | Princip pohybu konce ramene s mikrokamerou | 33 |
| 6.10 | Využití subsystému..... | 33 |
| 7 | Kontrolní výpočty hlavních konstrukčních uzlů..... | 35 |
| 7.1 | Kontrola ložisek..... | 35 |
| 7.1.1 | Ložisko SKF 3204 A | 35 |
| 7.1.2 | Ložisko SKF 61900 | 36 |
| 7.2 | Kontrola pohonu | 37 |
| 7.2.1 | Kontrola pohonu základu | 37 |
| 7.2.2 | Kontrola pohonu ramene..... | 38 |
| 7.3 | Kontrola čepu..... | 39 |
| 7.4 | Kontrola svarů..... | 41 |
| 7.4.1 | Kontrola svarů prvního ramene s hřídelí..... | 41 |
| 7.4.2 | Kontrola svarů druhého ramene s hřídelí | 42 |
| 8 | Závěr..... | 43 |
| 9 | Použitá literatura | 44 |
| 10 | Přílohy | 45 |
| 11 | Seznam použitých obrázků..... | 46 |
| 12 | Seznam použitých tabulek..... | 47 |

Seznam použitého označení

| Označení | Význam označení | Jednotka |
|--------------|--|-------------------------|
| C | dynamická únosnost ložiska | [kN] |
| C_0 | statická únosnost ložiska | [kN] |
| F_a | axiální síla působící na ložisko | [N] |
| F_r | radiální síla působící na ložisko | [N] |
| M_s | krouticí moment modelářského serva | [N·mm] |
| M_{HS50} | krouticí moment modelářského serva HS-50 | [N·mm] |
| M_{HS5085} | krouticí moment modelářského serva HS-5085MG | [N·mm] |
| M_{HS805} | krouticí moment modelářského serva HS-805MG | [N·mm] |
| M_{k1} | potřebný krouticí moment ramene 1 | [N·mm] |
| M_{k2} | potřebný krouticí moment ramene 2 | [N·mm] |
| P | ekvivalentní dynamické zatížení | [kN] |
| g | tíhové zrychlení | [m·s ⁻²] |
| L_{10} | základní trvanlivost, miliony otáček | [10 ⁶ ot] |
| L_{10h} | základní trvanlivost, provozní hodiny | [hod] |
| f_0 | součinitel vycházející z poměru F_a/C_0 | [-] |
| n_{HS50} | otáčky modelářského serva | [ot·min ⁻¹] |
| n_{HS5085} | otáčky modelářského serva | [ot·min ⁻¹] |
| n_{HS805} | otáčky modelářského serva | [ot·min ⁻¹] |
| m_{v1} | hmotnost všech hmot obou ramen konajících rotaci | [kg] |
| m_{v2} | hmotnost všech hmot druhého ramene konajících rotaci | [kg] |
| p | exponent rovnice trvanlivosti ložiska | [-] |

Seznam použitého označení

| Označení | Význam označení | Jednotka |
|-------------------|--|------------------------|
| δ_{HS50} | otočení modelářského serva HS-50 ve stupních | [°] |
| δ_{HS5085} | otočení modelářského serva HS-5085MG ve stupních | [°] |
| δ_{HS805} | otočení modelářského serva HS-805MG ve stupních | [°] |
| t_{HS5085} | doba dosažení max. rychlosti serva HS-5085MG | [s] |
| t_{HS805} | doba dosažení max. rychlosti serva HS-805MG | [s] |
| α_{HS50} | úhlové zrychlení modelářského serva HS-50 | [rad·s ⁻²] |
| α_{HS5085} | úhlové zrychlení modelářského serva HS-5085MG | [rad·s ⁻²] |
| α_{HS805} | úhlové zrychlení modelářského serva HS-805MG | [rad·s ⁻²] |
| ω_{HS50} | úhlová rychlost modelářského serva HS-50 | [rad·s ⁻¹] |
| ω_{HS5085} | úhlová rychlost modelářského serva HS-5085MG | [rad·s ⁻¹] |
| ω_{HS805} | úhlová rychlost modelářského serva HS-805MG | [rad·s ⁻¹] |
| l_1 | vzdálenost k těžišti obou ramen | [m] |
| l_2 | vzdálenost k těžišti druhého ramene | [m] |
| I_{r1} | moment setrvačnosti všech hmot konajících rotaci | [kg · m ²] |
| I_{r2} | moment setrvačnosti všech hmot konajících rotaci | [kg · m ²] |
| R_e | mez kluzu v tahu | [MPa] |
| p_D | dovolený měrný tlak | [MPa] |
| k | koeficient bezpečnosti: | [–] |
| $D_{\check{c}}$ | průměr čepu: | [mm] |
| F_s | síla serva na rameni b | [N] |
| $L_{\check{c}}$ | velikost čepu | [mm] |

Seznam použitého označení

| Označení | Význam označení | Jednotka |
|-----------------|---|----------|
| L_R | velikost táhla | [mm] |
| d | průměr hřídele | [mm] |
| D | průměr hřídele a svaru | [mm] |
| σ_D | dovolený tlak | [MPa] |
| $\tau_{D_{sv}}$ | dovolený krut svaru | [MPa] |
| τ_{II} | skutečný krut svaru | [MPa] |
| M_K | krouticí moment | [N·mm] |
| a | nosný průřez koutového svaru | [mm] |
| CCD | Charge-coupled device – zařízení s vázanými náboji | |
| CMOS | Complementary metal oxide semiconductor – výrobní technologie | |

1 Úvod

Vizuální systémy jsou nedílnou součástí dnešní doby. Například v robotice rozšiřují její možnosti, zejména ovládání ze vzdáleného pracoviště a orientaci v okolním prostředí. V našem případě se zajímáme o mikrokameru, s jejíž pomocí můžeme pronikat do míst s obtížnými přístupy a prozkoumat je.

Pro orientaci mobilního robotu (MR) řízených na dálku se nejčastěji používají kamery, které odesílají snímáný obraz na operátorské stanoviště. Tyto kamery lze dále rozdělit do skupin podle jejich použití a specifikací jako je kvalita obrazu, váha, rozměr, spotřeba energie a další.

Bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem subsystému pro zadanou miniaturní kameru. Takový to subsystém bude připojen na MR či rameno a provádět vizuální průzkum. K tomuto slouží dostatečný dosah a podle místa upevnění potřebný počet stupňů volnosti. Subsystém poskytuje také možnost přisvícení pro špatně osvětlené oblasti. K tomu slouží jasná led dioda, upevněná spolu s mikrokamerou na konci ramene.

Tento subsystém bude použit pro prozkoumávání těžko dostupných, polozavřených a tmavých míst, k získání potřebných informací.

2 Mikrokamery

Miniaturní kamery (mikrokamery) jsou vhodné zejména pro vestavbu do nejrůznějších zařízení (roboty, dálkově ovládané modely, čtecí zařízení, video mikroskopy apod.), pro skryté sledování nebo pro různé mobilní aplikace apod.

Nejmenší miniaturní kamery běžně k prodeji mají rozměry pouhých 11x11x18mm a mohou být vybaveny tzv. pinhole objektivem se vstupní pupilou velikosti špendlíkové hlavičky, případně může být objektiv maskován knoflíkem nebo hlavičkou šroubu. [8]

Miniaturní kamery Misumi jsou vybaveny CMOS snímačem nové generace (CCIQ-II). Kamery dosahují díky boosteru se ziskem +42dB velmi vysoké citlivosti. Implementovaný firmware ke zvýšení ostrosti, 16-zónové řízení expozice a velký rozsah závěrky zajišťují na tuto třídu kamer špičkovou kvalitu obrazu. K dispozici je též model s CCD snímačem, u kterého je miniaturní kamerová hlava (CCD snímač & objektiv) propojena kablíkem s ostatní elektronikou kamery. [8]

2.1 Druhy miniaturních kamer

Mikrokamery (Miniaturní kamery)

Miniaturní kamery jsou dodávány s dírkovými (Pinhole) objektivy v provedení s maskováním dírkového objektivu (např. v hlavě šroubku (Obr.1), knoflíku, kónické nebo ploché provedení Pinhole, apod.). Miniaturní kamery se liší rozměry (8x8, 12x12, 14x14 mm) a obrazovým senzorem (CMOS, CCIQ, CCD), tj. kvalitou obrazu, rozlišením a citlivostí na min. osvětlení. [8]



Obr.1

Deskové kamery

Deskové CCD kamery (obr.2) jsou určeny pro vestavbu do různých zařízení a komplexních celků, pro monitorování automatizovaných technologických provozů v průmyslu, jako jsou např.: roboty, montážní linky, podavače, dopravní pásy, stroje pro obrábění a tvarování kovů, výstupní kontrola výrobků apod. Deskové kamery s dírkovým (Pinhole) objektivem je možno také zabudovat a maskovat jako skryté kamery. K deskovým CCD kamerám je nabízena řada miniaturních objektivů s různými úhly záběru. [8]



Obr.2

Maskované kamery se záznamem

Maskované kamery se záznamem (obr.3) jsou vybaveny rekordérem s bezpečnostními funkcemi: nastaveným časovým harmonogramem a aktivací záznamu při pohybu. Kamery s integrovaným rekordérem je možno napájet z tužkových baterií, proto je možno záznamové kamery používat jako nezávislé a snadno přenosné. [8]



Obr.3

Skryté kamery

Skryté kamery jsou nabízeny v různém provedení, například jako maskované kamery v brýlích (obr.4), sluchátku, peru, knoflíku, šroubu, pohybovém PIR čidle, dveřním kukátku, ap. Ke skrytým kamerám je možno přikoupit kapesní rekordéry. [8]



Obr.4

Speciální kamery

Speciální kamerové soupravy (obr.5) jsou dodávány v různém provedení, např.: válečková kamera s kapesním rekordérem, kamerové soupravy s maskovanou kamerou (v brýlích, ve sluchátku, nebo peru) a nebo kamery určené do nepřístupných

míst (s ohebným krkem, teleskopické). Kapesní rekordéry je možno zakoupit zvlášť nebo jsou již součástí kamerové soupravy. K mobilním rekordérům je možno rovněž přikoupit záložní baterie, napájecí soupravu baterií a paměťové karty s různou kapacitou. [8]



Obr.5

2.2 Použitá miniaturní kamera

MO-S691P barevná miniaturní kamera maskovaná v knoflíku (obr.6). [8]

- obrazový senzor CMOS 1/3''
- horizontální rozlišení 380 TV řádek
- minimální osvětlení 3Lux (F1.2)
- automatická elektronická závěrka (AES)
- dírkový objektiv 3,7 mm (F2.0)
- rozměry 12(š) x 12(v) x 10(h) mm
- napájení 7-12VDC
- napájení z externího zdroje, z rekordéru MP-415P / MP-469P nebo z převodníku UCD-110



Obr.6 - MO-S691P

2.3 Použití mikrokamer

- Medicína
- Armáda
- Policie
- Letectvo

Jednou z nejvýznamnějšího použití mikrokamery najdeme určitě v lékařství. Ať už používané v dnešní době ale i s vidinou budoucího použití.

Kapslová endoskopie

Kapsle (obr.7) má v sobě umístěnu mikrokameru na obou koncích. Během vyšetření vysílá obrázky, které jsou ukládány do datarekordéru a později prohlíženy a vyhodnoceny lékařem. Tato metoda je bezbolestná, po polknutí se pohybuje v tenkém a později v tlustém střevě. [13]



Obr.7 - Kapsle

Endoskop

Metoda umožňující prohlédnutí vnitřních tělesných dutin nebo dutých orgánů. Do těchto dutin se endoskop (obr.8) zavádí přirozenými otvory (např. ústy, konečníkem, močovou trubicí) či otvory uměle pro tento účel vytvořenými (u laparoskopie, mediastinoskopie). Její rozvoj byl ovlivněn technickým vývojem v oblasti optiky (ohybná vlákna vedoucí světlo) a videa. Takže může být na konci umístěna mikrokamera pro snímání a zachycování obrazu. V dnešní době ještě pořád převládá optická varianta ale v budoucnu jak se budou potřeby zvětšovat a nástroje zmenšovat, bude použití mikrokamer větší. Zejména při operacích aby bylo dosaženo co nejmenšího poranění.

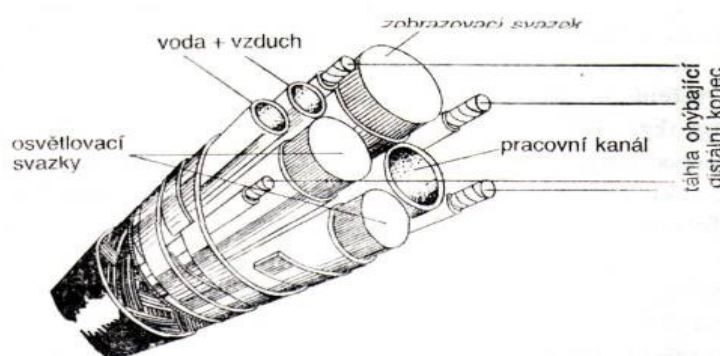


Obr.8 - Endoskop

Fibroskopy

Obdoba endoskopu. Jsou to ohebné optické sondy, které přenášejí obraz z nepřístupných míst prostřednictvím svazku optických vláken.

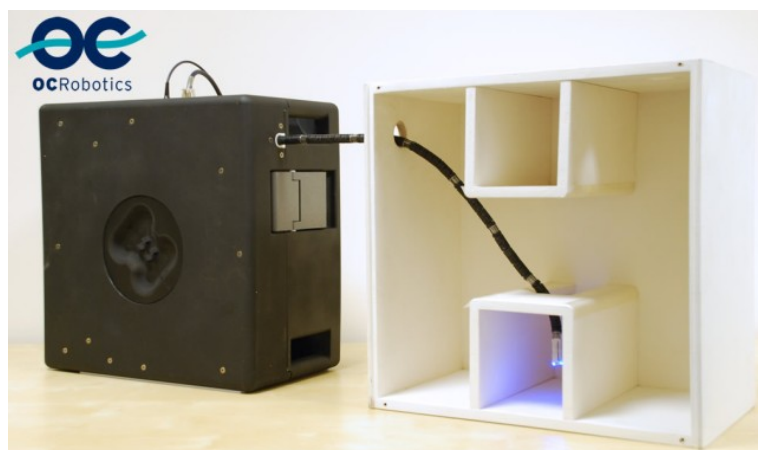
Ke všem moderním fibroskopům (obr.9) lze připojit zařízení pro záznam obrazu – klasický nebo digitální fotoaparát, videokameru nebo digitalizační jednotku, což umožňuje zpracovávat data na počítači a to jak off-line tak i on-line. [14]



Obr.9 - Fibroskop

Malé hadí rameno (snake arm)

OC Robotics vyvinula hadí-rameno (flexibilní paže) robota (obr.10), která má jen 1/2" (12,5 mm) v průměru. Rameno robota je umístěno v přenosném boxu. Napájení je pomocí sítě, externí baterii nebo interní baterie. Je 24" (610 mm) dlouhé, delší dosah je zatím ve vývoji, a bylo určeno pro americké ministerstvo obrany, které potřebovalo způsob kontroly a manipulaci v uzavřených nebo přeplněných prostorech. [12]



Obr.10 - Malé hadí rameno

Průzkumný robot Orpheus

Orpheus (obr.11) je dálkově ovládaný mobilní průzkumný robotický systém určený zejména k průzkumu oblastí pro člověka nebezpečných nebo nepřístupných. Typické aplikace pro takový stroj: robot záchranář, pyrotechnický robot, vojenský průzkumný robot. Robotický systém sestává ze dvou základních částí - mobilního robotu samotného a vzdáleného řídicího či operátorského stanoviště. Řízení robotu je prováděno operátorem v reálném čase, a to pomocí tzv. teleprezenčních vizuálních technik. Datový přenos je obousměrný a bezdrátový. [15]



Obr.11 - *Orpheus*

3 Požadavkový list

Úkoly a požadavky pro vypracování bakalářské práce:

- na konci ramene 2 stupně volnosti
- dosah do 500 mm (dle varianty až i 700 mm)
- kabeláž vedena uvnitř
- těsnost mechanismu
- současný stav (mikrokamera)
- pokud možno použít přisvícení
- hmotnost vychází z kamery (použitých součástí)
- minimalizovat hmotnost
- rychlost pohybů do 0,5 m/s
- použití elektrických pohonů

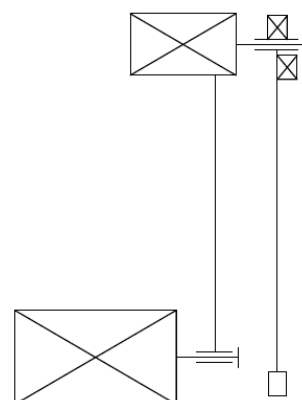
4 Varianty řešení:

4.1 Návrh variant:

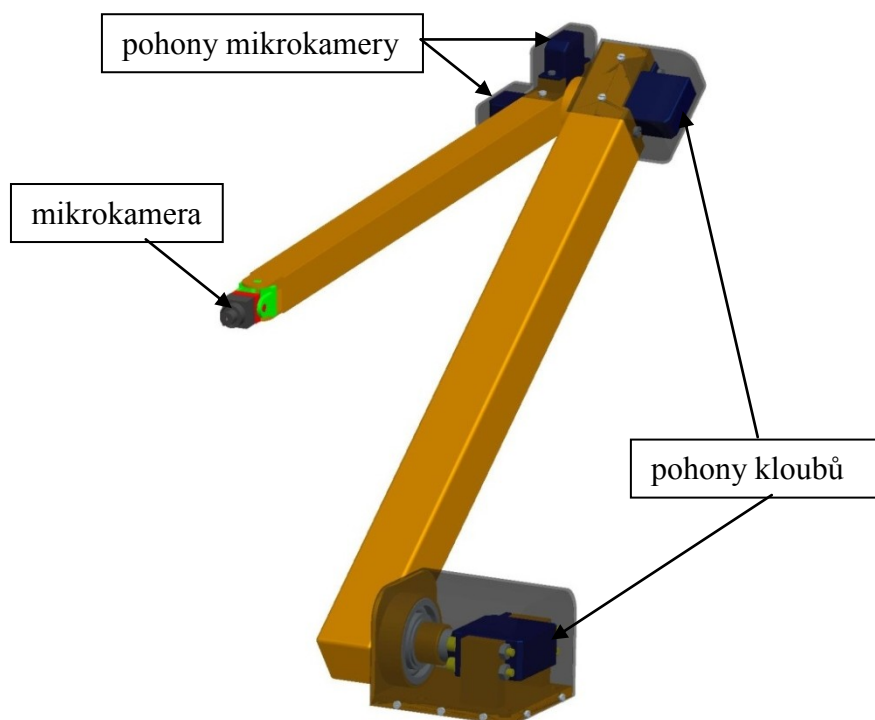
4.1.1 Varianta 1

První varianta (obr.12-13) je inspirována manipulační nadstavbou většiny průzkumných robotu. Jedná se o variantu s použitím dvou skládajících se ramen. Vzhledem k hmotnosti ramen a celého subsystému je využíváno modelářských serv pro pohon a to pro každé rameno jedno. Tato kombinace (kinematická struktura) umožňuje dosah na méně dostupná místa. Další velkou výhodou je možnost složení do velmi skladné polohy. Na konci druhého ramene se nachází knoflíková kamera (mikrokamera), jež má dva stupně volnosti a tudíž nám umožňuje naklápění do dvou os, což ještě více zefektivní prozkoumání špatně dostupných míst.

Tyto dva stupně volnosti zajišťují dva další pohony (modelářská serva) připevněné na druhém rameni a ty pomocí lanek kamerou pohybují.



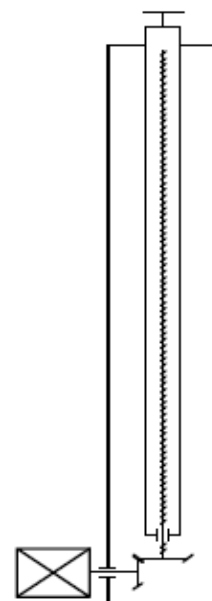
Obr.12 – Kinematické schéma



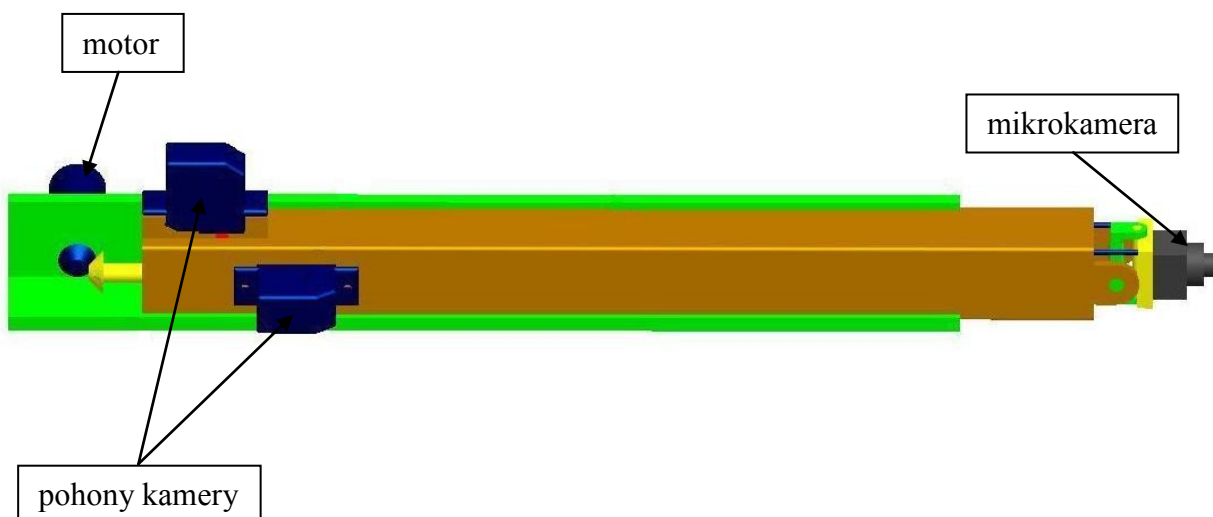
Obr.13 - Varianta 1

4.1.2 Varianta 2

U varianty 2 (obr.14-15) je využit krokový motor (či modelářské servo), který za pomoci dvou kuželových ozubených kol, přenáší kroutící moment na pohybový šroub. Zde pomocí matice, která je pevně připojena k rameni, dochází k přeměně rotačního pohybu na pohyb translační. Na konci výsuvného ramene se nachází knoflíková kamera, která je pevně uchycena na kloubovém mechanismu a tudíž má dva stupně volnosti (možnost naklápění do dvou os). Tyto pohyby nám zajišťují dva pohony (modelářské serva), jež pomocí spojení lanek pohonu a jednoho z kloubů zajišťují požadovaný stupeň volnosti. Tato varianta by mohla být využita například pro připevnění na rameno robotu, čímž by se zvýšily i její možnosti dosahu a použití.



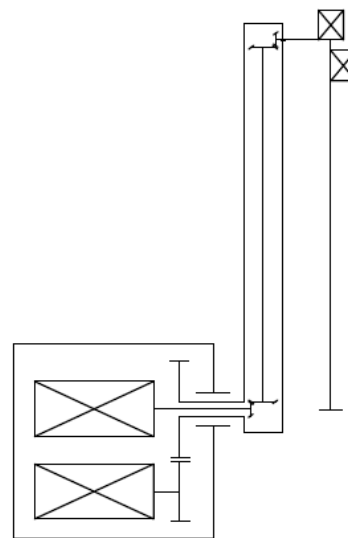
Obr.14 -Kinematické schéma



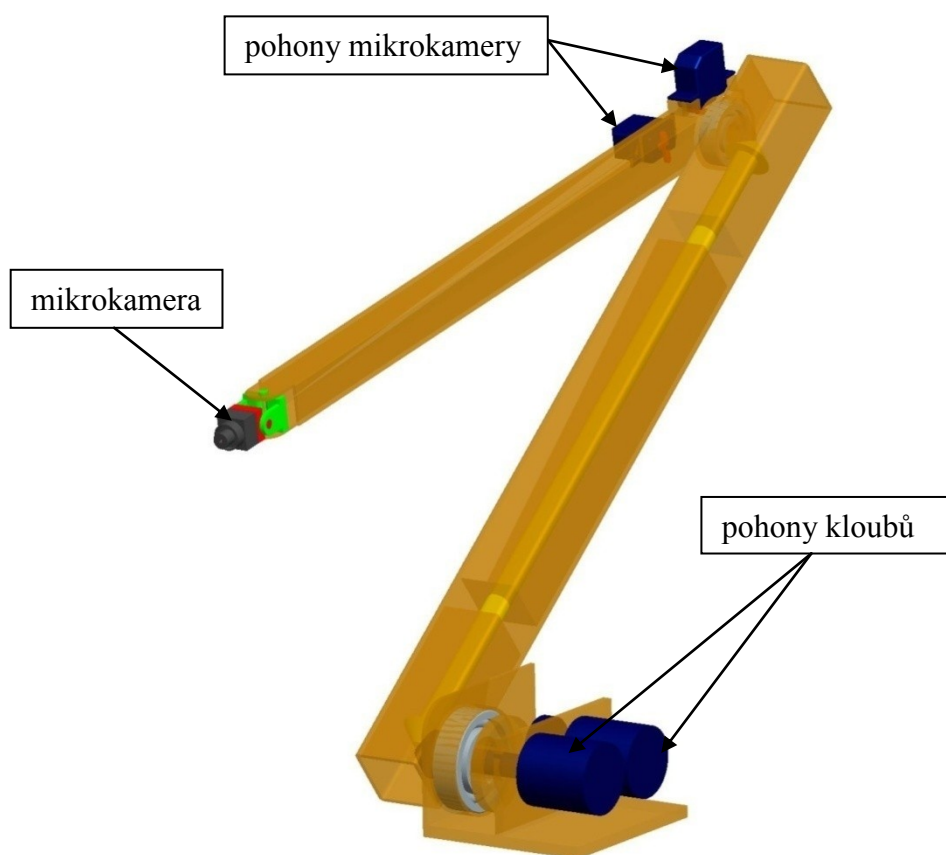
Obr.15 - Varianta 2

4.1.3 Varianta 3

Varianta 3 (obr.15-16) je konstrukčně nejsložitější. Na základně jsou umístěny dvě pohonné jednotky (ve skříní), kdy každá pohání jedno rameno (jeden stupeň volnosti). Přes složité převodové mechanismy jsou jejich pohyby převedeny do příslušných kloubů, kde vykonávají požadované pohyby a vzájemně se neovlivňují. Při této variantě získávají ramena příznivější vlastnosti, převážně v hmotnosti. Na konci druhého ramene je umístěna knoflíková kamera (mikrokamera), jež má dva stupně volnosti a tudíž nám umožňuje naklápění do dvou os, což ještě více zefektivní prozkoumání špatně dostupných míst. Tyto dva stupně volnosti zajišťují dva další pohony (modelářská serva) připevněné na druhém rameni a ty pomocí lanek kamerou pohybují.



Obr.16 – *Kinematické schéma*



Obr.17 - *Varianta 3*

4.2 Hodnotová analýza

Hodnotová analýza je postup, díky kterému vybereme optimální variantu.

K jejímu provedení je třeba si zvolit kritéria a k nim přiřadit číselnou hodnotu podle bodové stupnice hodnocení.

Volba hlavních kritérií:

Byla zvolena tato kritéria:

| Označení kritéria | Kritérium | Charakteristika kritéria |
|-------------------|--------------------------|---|
| K1 | Dosah | Velikost fyzického dosahu od základu |
| K2 | Počet stupňů volnosti | Počet stupňů volnosti manipulátoru |
| K3 | Minimální vnější rozměry | Požadavek na minimální rozměry |
| K4 | Konstrukce | Důraz na jednoduchost konstrukce (výroba, montáž) |

Tabulka 1

Zhodnocení vybraných kritérií:

| | Kritérium | Varianta 1 | Varianta 2 | Varianta 3 |
|----|--------------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| K1 | Dosah | 700 mm | 500 mm | 700 mm |
| K2 | Počet stupňů volnosti | 4° | 3° | 4° |
| K3 | Minimální vnější rozměry | Střední | Malé | Střední |
| K4 | Konstrukce | Středně složitá | Středně složitá | Velmi složitá |

Tabulka 2

Volba bodovací stupnice:

| Hodnoty kritérií | Označení |
|---------------------|----------|
| Vysoká úroveň | 6 |
| Dobrá úroveň | 5 |
| Průměrná úroveň | 4 |
| Nízká úroveň | 3 |
| Nevyhovující úroveň | 2 |
| Nepříznivý stav | 1 |

Tabulka 3

Přiřazení faktoru významnosti:

Pro váhu významnosti q byla zvolena lineární závislost.

$$q = 0,25 \cdot v + 0,75 \quad [5]$$

K určení významnosti bylo použito metody porovnání v trojúhelníkovém páru [5]

| Porovnávané páry kritérií | | | Počet voleb v | Pořadí | Váha významnosti q |
|---------------------------|----|----|-----------------|--------|----------------------|
| K1 | K1 | K1 | 3 | 1 | 1,5 |
| K2 | K3 | K4 | – | – | – |
| | K2 | K2 | 1,5 | 2, 3 | 1,125 |
| | K3 | K4 | – | – | – |
| | K3 | K3 | 1,5 | 2, 3 | 1,125 |
| | K4 | K4 | 0 | 4 | 0,75 |

Tabulka 4

Obodování jednotlivých variant:

| Kritérium | Varianta 1 | Varianta 2 | Varianta 3 |
|-----------|------------|------------|------------|
| K1 | 6 | 4 | 6 |
| K2 | 5 | 4 | 5 |
| K3 | 4 | 6 | 5 |
| K4 | 5 | 5 | 3 |

Tabulka 5

Zhodnocení a výběr optimální varianty:

| Varianta 1 | | | |
|--|---------|-------------------------------|----------------------------------|
| Kritérium | Hodnota | Váha významnosti kritéria q | Vážený index kritéria I_{ij}^* |
| K1 | 6 | 1,5 | 9 |
| K2 | 5 | 1,125 | 5,625 |
| K3 | 4 | 1,125 | 4,5 |
| K4 | 5 | 0,75 | 3,75 |
| Celkový součet vážených indexů I_{ij}^* varianty 1 | | | 22,875 |

Tabulka 6

| Varianta 2 | | | |
|--|---------|-------------------------------|----------------------------------|
| Kritérium | Hodnota | Váha významnosti kritéria q | Vážený index kritéria I_{ij}^* |
| K1 | 4 | 1,5 | 6 |
| K2 | 4 | 1,125 | 4,5 |
| K3 | 6 | 1,125 | 6,75 |
| K4 | 5 | 0,75 | 3,75 |
| Celkový součet vážených indexů I_{ij}^* varianty 2 | | | 21 |

Tabulka 7

| Varianta 3 | | | |
|--|---------|-------------------------------|----------------------------------|
| Kritérium | Hodnota | Váha významnosti kritéria q | Vážený index kritéria I_{ij}^* |
| K1 | 6 | 1,5 | 9 |
| K2 | 5 | 1,125 | 5,625 |
| K3 | 5 | 1,125 | 5,625 |
| K4 | 3 | 0,75 | 2,25 |
| Celkový součet vážených indexů I_{ij}^* varianty 3 | | | 22,5 |

Tabulka 8

Zhodnocení:

| Varianta | Celkový součet vážených indexů I_{ij}^* |
|----------|---|
| 1 | 22,875 |
| 2 | 21 |
| 3 | 22,5 |

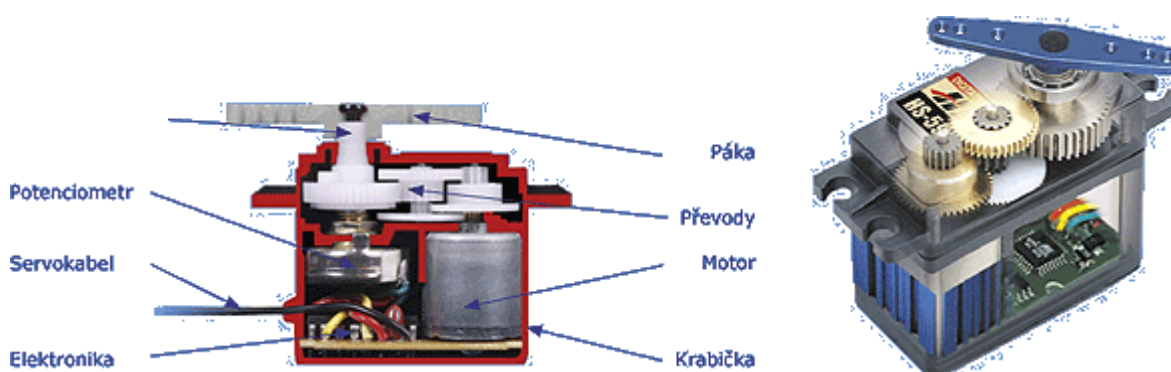
Tabulka 9

Po dokončení hodnotové analýzy vyšla jako optimální varianta 1.

5 Servo

Jedná se o spolehlivou, levnou polohovou jednotku. Nejčastěji používanou u rádiem řízených RC modelů, malých automatizačních zařízení, domácností, často ale také u malých školních robotů.

Servo (obr.18) obsahuje stejnosměrný motorek, převodovku a s výstupní hřídelí spřažený miniaturní potenciometr používaný jako senzor úhlu natočení pro regulační obvod polohy. [2]



Obr.18 - Popis serva

Motor vyvozuje krouticí moment, jeho síla je zhruba úměrná velikosti motoru.

Převodový poměr určuje poměr mezi rychlostí a tahem serva. Běžné je, že se serva vyrábějí ve dvojicích, které mají stejný motor a elektroniku, ale liší se převody - např. HS-625 a HS-645. Jedno z nich je potom silnější, ale pomalejší, druhé má zvýšenou rychlost na úkor tahu. Převody jsou nejčastěji plastové, pro větší zatížení a větší spolehlivost pak kovové. [6]

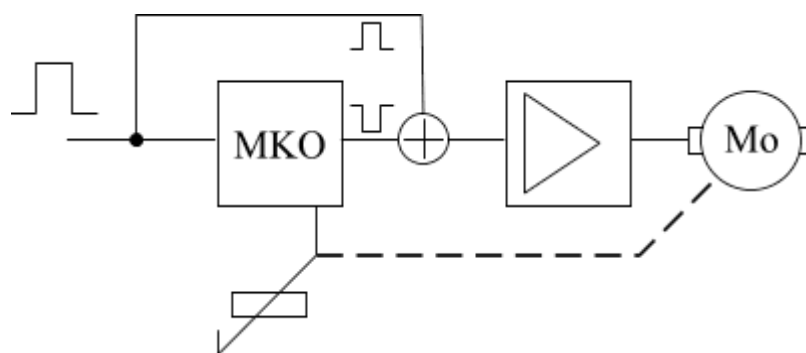
Potenciometr snímá polohu výstupního hřídele a uzavírá tak zpětnou vazbu zajišťující správnou činnost serva. U menších a levnějších serv je potenciometr připojen přímo na výstupní hřídel, u serv vyšších kategorií je připojen přes zvláštní převod (tzv. nepřímý náhon), který velmi účinně chrání před přenosem vibrací. Poškození odporové dráhy potenciometru se může projevit jako zaškubávání serva v určité poloze nebo chvění v neutrální poloze. [6]

Výstupní hřídel přenáší pohyb mechanismu serva na ovládací páku. U serv menších a nižších kategorií je uložen v plastovém pouzdru, serva vyšších kategorií mají pro přesnější chod a vyšší životnost kuličková ložiska (jedno nebo ještě lépe dvě). [6]

Krabička je vyrobena z houževnatého plastu a je opatřena pat-kami pro montáž serva do modelu. [6]

Přívodní kablík třížilový kablík se silikonovou izolací s velkou ohebností. U serv větších rozměrů bývá z krouceného vodiče pro potlačení indukce rušivých napětí při vysokých proudech. Serva Hitec a Multiplex jsou zapojena následovně: žlutý(oranžový) vodič: řídicí signál, červený: kladný pól napájení („plus“), hnědý: záporný pól napájení („minus“, „zem“). [6]

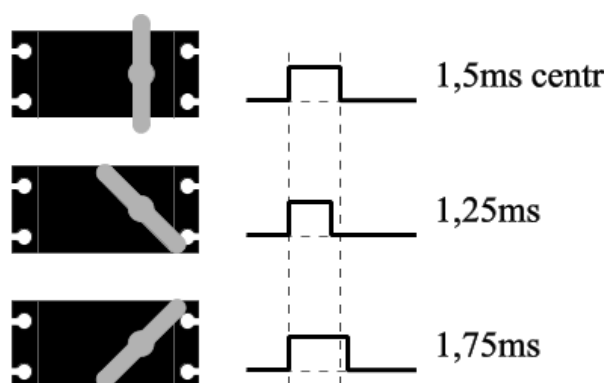
Zjednodušené zapojení elektroniky je na blokovém schématu (obr.19). Do vstupu přichází řídicí impuls, který spustí monostabilní klopný obvod, ten vygeneruje impuls o délce odpovídající momentální poloze serva a opačné polarity než je vstupní řídicí impuls. Tyto dva impulsy se porovnají a výsledkem je rozdílový impuls, který po zesílení přes můstkový spínač způsobí roztočení elektromotoru jedním nebo druhým směrem. Elektromotor přes převodovku otáčí výstupní hřídeli a současně i potenciometrem, který působí jako zpětná vazba do monostabilního klopného obvodu. Směr otáčení je takový, že impuls generovaný monostabilním klopným obvodem se svojí délkou přibližuje délce vstupního řídicího impulsu a až jsou oba impulsy stejně dlouhé, elektromotor se zastaví. Servo dosáhlo polohu, která odpovídá momentálně přijímanému řídicímu impulsu.



Obr.19 - Blokové schéma

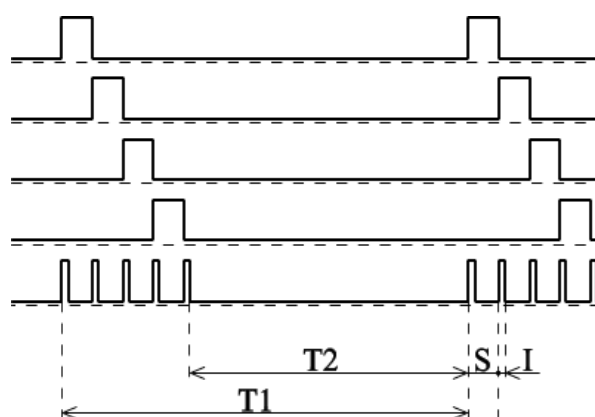
5.1 Řízení serva

Dnes používaná serva pracují s kladnými řídicími impulsy o délce 1-2ms. Délce impulsu 1,5ms odpovídá střední poloha serva, 1ms je jedna a 2ms druhá krajní poloha. Mechanické provedení serva může být takové, že servo je schopno pohybu v rozsahu o něco větším než 180 stupňů, ale není to pravidlem. Většina serv má na koncích rozsahu pohybu mechanické blokování, na což je potřeba dávat pozor, protože při dojetí na doraz se výrazně zvýší proud odebíraný servem a může to skončit tím, že shoří elektronika serva. [7]



Obr.20 - Řízení

Jak už bylo o něco výše napsáno, dnes používaná serva pracují s kladnými řídicími impulsy o délce 1-2ms. Tyto impulsy se opakují většinou s frekvencí kolem 50Hz. Rychlost opakování není kritická, pokud budou řídicí impulsy přicházet méně často, pouze se zpomalí rychlost pohybu serva. Velikost impulsů je rovná velikosti napájecího napětí serva, což je 4,8-6V. Takto vypadají impulsy na výstupu modelářského přijímače (obr.21). Řídicí impulsy pro jednotlivá serva se opakují přibližně v rytmu 50Hz (první čtyři). Pátý průběh ukazuje, jak vypadá výstupní signál kodéru modelářského vysílače pro 4 serva. Podle typu kodéru zůstává konstantní buď T1 a skupiny impulsů se opakují v pravidelném rytmu (kolem 50Hz), nebo je konstantní mezera mezi skupinami impulsů T2 (většinou 10-15ms). S je délka řídicího impulsu pro jedno servo (1-2ms), I je oddělovací impuls (0,25-0,3ms). [7]



Obr.21 - Impulsy

5.2 Hlavní parametry serva

- Síla tahu (udává se obvykle v kg/cm)
- Rychlost (udává se jako doba, za níž páka serva opíše určitý úhel - např. 0,18s/60°)
- Převody (plastové nebo kovové)
- Kuličková ložiska a jejich počet
- Rozměry a hmotnost

5.3 Použitá serva

V subsystému jsou použity tři serva Hitec. [9]

Microservo Hitec HS-50



Obr.22 - Servo HS-50

Napájení: 4.8 [V]

Rychlost: 0.09 [sec/60°]

Síla: 0.6 [kg.cm]

Rozměry: 20.9 x 11.4 x 22 [mm]

Hmotnost: 6.1 [g]

Servo Hitec HS-5085MG



Obr.23 - Servo HS-5085MG

Napájení: 6 [V]

Rychlost: 0.13 [sec/60°]

Síla: 4.3 [kg.cm]

Rozměry: 29 x 13 x 30 [mm]

Hmotnost: 21.9 [g]

Servo Hitec HS-805MG



Obr.24 - Servo HS-805MG

Napájení: 6 [V]

Rychlost: 0.19 [sec/60°]

Síla: 24.7 [kg.cm]

Rozměry: 66 x 30 x 57.6 [mm]

Hmotnost: 152 [g]

5.4 Přepočet parametrů modelářských serv

Parametry modelářských serv jsou zadány v netradičních jednotkách. Je potřeba je převést na standardní jednotky.

5.4.1 Moment M_s – převod kroutícího momentu z $[kg \cdot cm]$ na $[N \cdot mm]$

Moment 1 $[kg \cdot cm]$:

$$M_s = 1[kg \cdot cm] = 98,1[N \cdot mm] \quad [19] \quad [5.1]$$

5.4.2 Servo HS-50

Moment:

$$M_{HS50} = 0,6[kg \cdot cm] \quad [5.2]$$

$$M_{HS50} = 0,6 \cdot M_s = 0,6 \cdot 98,1 = 58,86[N \cdot mm] \quad [5.3]$$

Převod rychlosti serva HS-50 z $[sec/60^\circ]$ na $[rad/s^{-1}]$:

$$\omega_{HS50} = 0,09[sec/60^\circ] \quad [5.4]$$

Otočení za minutu ve stupních:

$$\delta_{HS50} = \frac{60 \cdot 60}{\omega_{HS50}} = \frac{60 \cdot 60}{0,09} = 40000[^\circ] \quad [5.5]$$

Otáčky:

$$n_{HS50} = \frac{\delta}{360} = \frac{40000}{360} = 111,11[ot \cdot min^{-1}] \quad [5.6]$$

Úhlová rychlost:

$$\omega_{HS50} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{HS50}}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 111,11}{60} = 11,635[rad/s^{-1}] \quad [5.7]$$

5.4.3 Servo HS-5085MG

Moment:

$$M_{HS5085} = 4,3[kg \cdot cm] \quad [5.8]$$

$$M_{HS5085} = 4,3 \cdot M_s = 4,3 \cdot 98,1 = 422[N \cdot mm] \quad [5.9]$$

Převod rychlosti serva HS-5085 z $[sec/60^\circ]$ na $[rad/s^{-1}]$:

$$\omega_{HS5085} = 0,13[sec/60^\circ] \quad [5.10]$$

Otočení za minutu ve stupních:

$$\delta_{HS5085} = \frac{60 \cdot 60}{\omega_{HS5085}} = \frac{60 \cdot 60}{0,13} = 27692,3[^\circ] \quad [5.11]$$

Otáčky:

$$n_{HS5085} = \frac{\delta}{360} = \frac{27692,3}{360} = 76,92[ot \cdot min^{-1}] \quad [5.12]$$

Úhlová rychlost:

$$\omega_{HS5085} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{HS5085}}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 76,92}{60} = 8,055[rad/s^{-1}] \quad [5.13]$$

5.4.4 Servo HS-805MG

Moment:

$$M_{HS805} = 24,7[kg \cdot cm] \quad [5.14]$$

$$M_{HS805} = 24,7 \cdot M_s = 24,7 \cdot 98,1 = 2423[N \cdot mm] \quad [5.15]$$

Převod rychlosti serva HS-805 z $[sec/60^\circ]$ na $[rad/s^{-1}]$:

$$\omega_{HS805} = 0,19[sec/60^\circ] \quad [5.16]$$

Otočení za minutu ve stupních:

$$\delta_{HS805} = \frac{60 \cdot 60}{\omega_{HS805}} = \frac{60 \cdot 60}{0,19} = 18947,3[^\circ] \quad [5.17]$$

Otáčky:

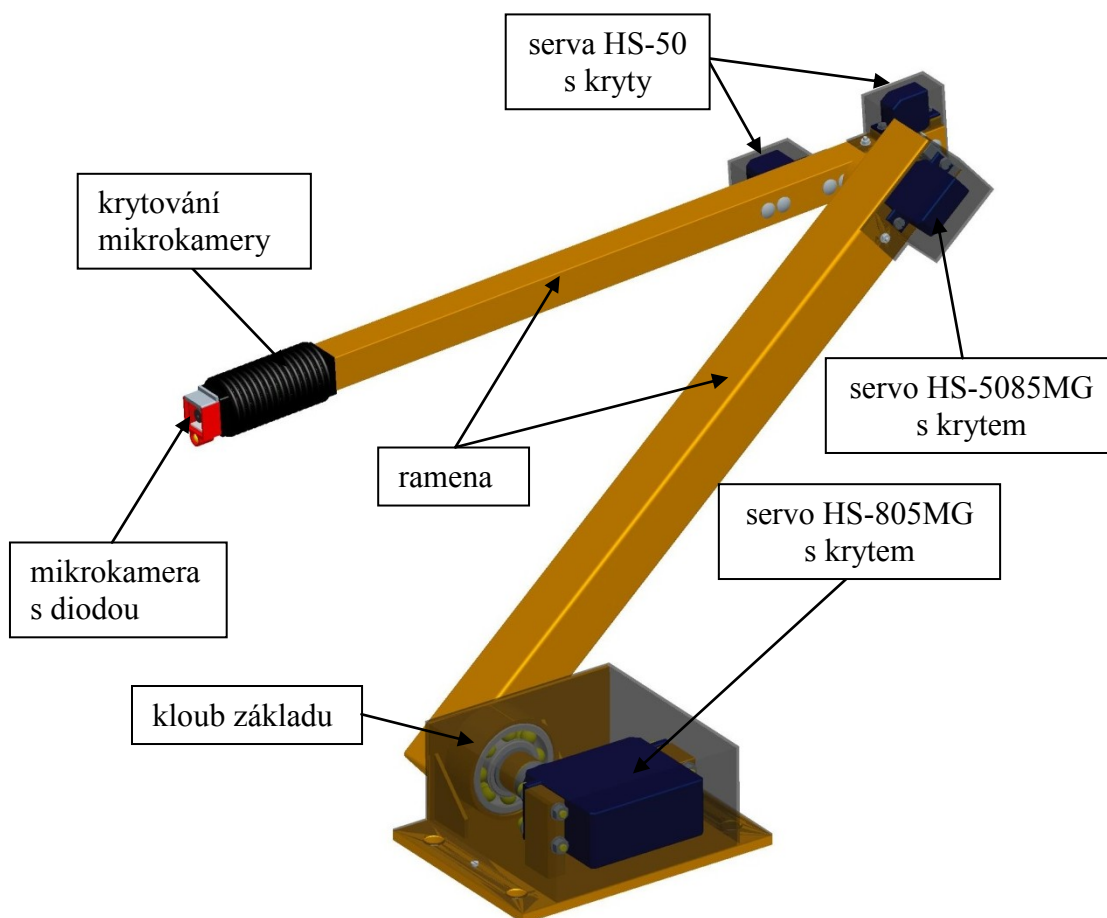
$$n_{HS805} = \frac{\delta}{360} = \frac{18947,3}{360} = 52,63[ot \cdot min^{-1}] \quad [5.18]$$

Úhlová rychlost:

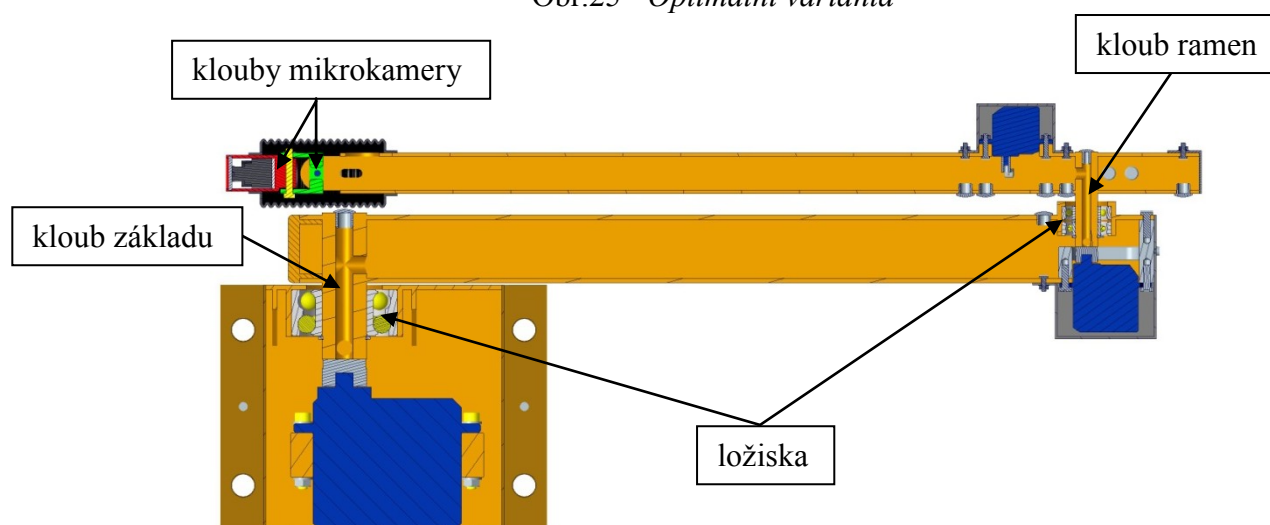
$$\omega_{HS805} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{HS805}}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 52,63}{60} = 5,511[rad/s^{-1}] \quad [5.19]$$

6 Konstrukční řešení optimální varianty

Vybraná optimální varianta (obr.25-26) se vyznačuje čtyřmi stupni volnosti, dostatečným dosahem, malou hmotností a možností přisvícení.



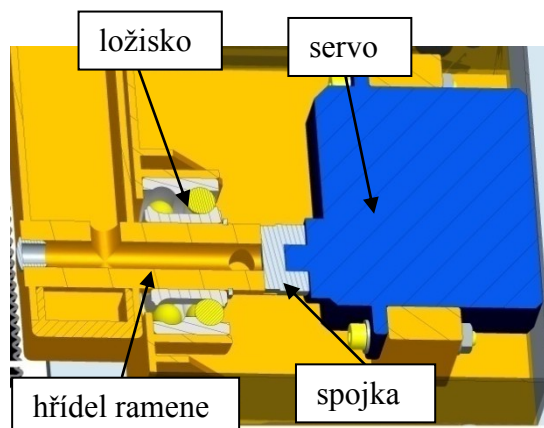
Obr.25 - *Optimální varianta*



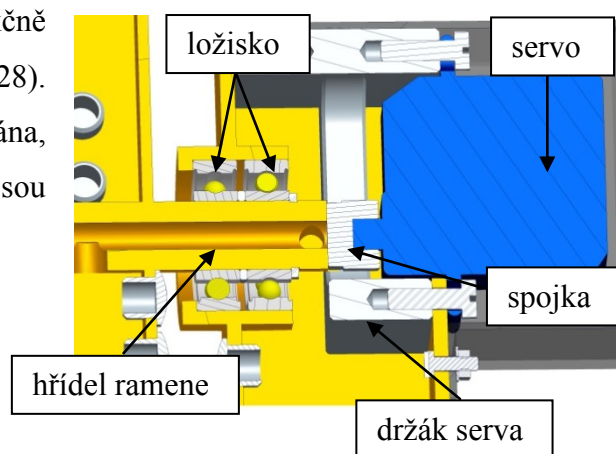
Obr.26 – Řez *optimální variant*

6.1 Konstrukce kloubů ramen (1. a 2. stupeň volnosti)

První a druhý stupeň volnosti, které zajišťují ramena subsystému, jsou řešeny stejným principem. Jako pohon je použito servo a pomocí spojky, která zapadá do hřídele, otáčí příslušným ramenem. V každém kloubu se nachází radiální ložisko. Základ je opatřen dvouřadým kuličovým ložiskem s kosoúhlým stykem (obr.27). U druhého kloubu jsou použity dvě kuličková ložiska s malými rozměry, aby konstrukčně vyhovovaly daným rozměrům (obr.28). Všechna ložiska jsou silně předimenzována, ale z hlediska konstrukčního řešení jsou vhodná.



Obr.27 - Kloub ramene 1

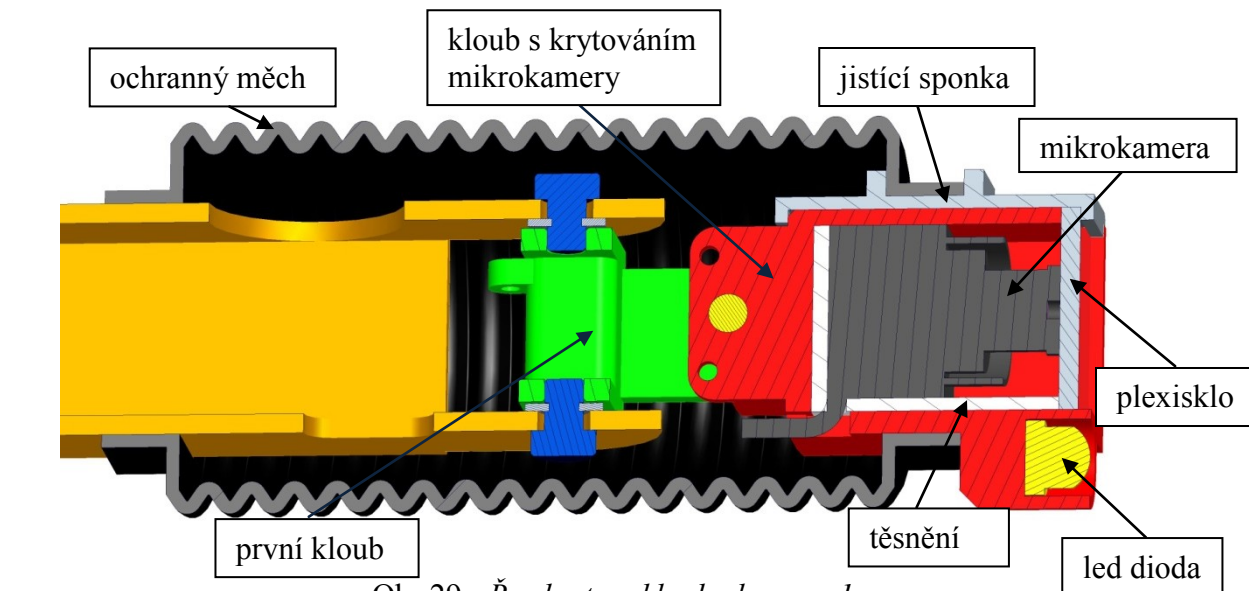


Obr.28 - Kloub ramene 2

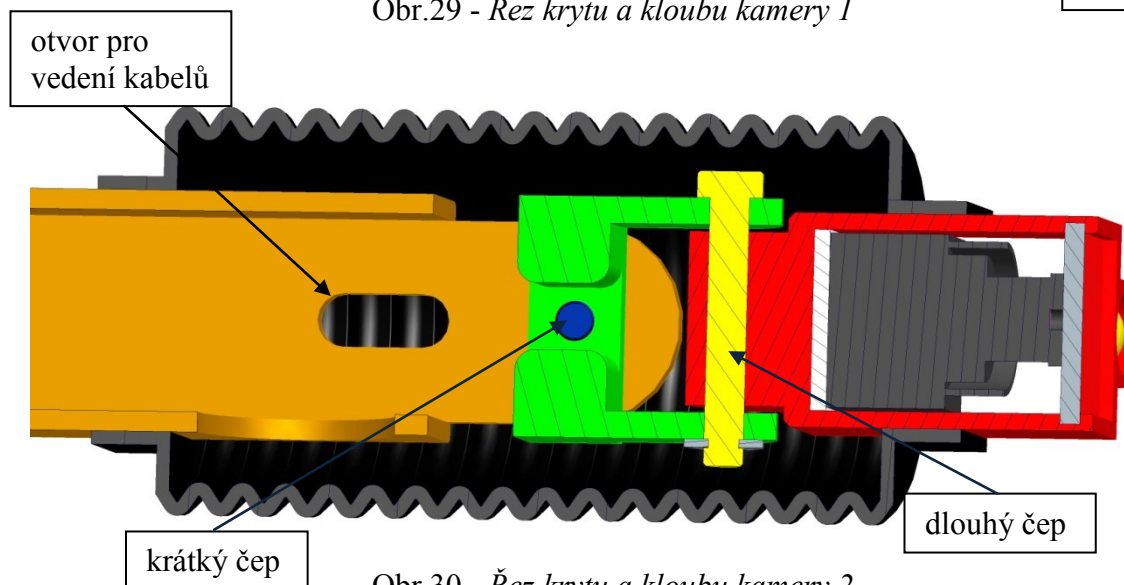
6.2 Konstrukce uchycení mikrokamery

Mikrokamera je vložena do krytu s těsněním, jež je součástí druhého kloubu. Po vložení průhledného plexiskla, které ji chrání a uzavírá tak poslední nechráněnou část. Dále je plexisklo jištěno tvarovou sponkou, opatřenou dvěma výběžky, do kterých se navleče gumový měch. Měch je pružný, takže umožňuje natáčení a zbylou ochranu. Součástí krytu mikrokamery je také prostor pro vložení a zachycení led diody, umožňující přisvícení (obr.29-30).

Tato část subsystému zajišťuje další dva stupně volnosti, které umožňují natáčení kamery. K tomu slouží dva klouby uchycené na čepech a připojené na pohony pomocí nerezových lanek.



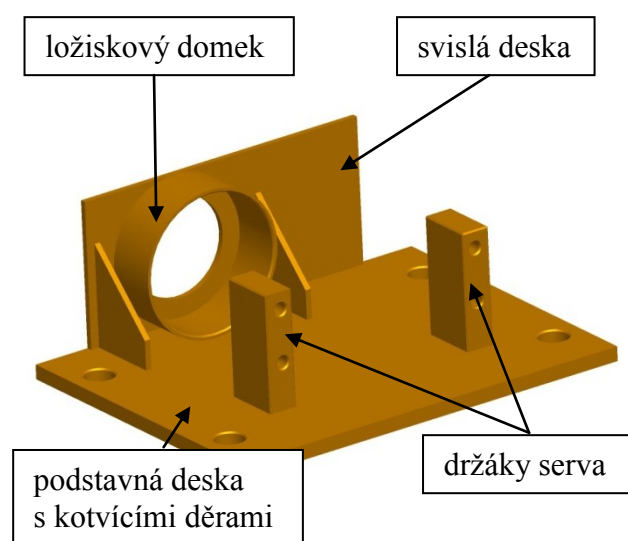
Obr.29 - Řez krytu a kloubu kamery 1



Obr.30 - Řez krytu a kloubu kamery 2

6.3 Konstrukce základny

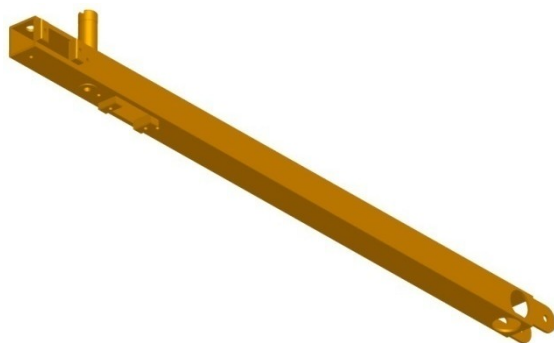
Základní část (obr.31) celého subsystému je kombinací svařených hliníkových profilů a plechu. Je zde vytvořen ložiskový domek, který je upevněn na svislé desce. Na podstavné desce, v níž jsou vytvořeny kotvící díry pro uchycení subsystému, se nacházejí také připevněné držáky příslušného serva.



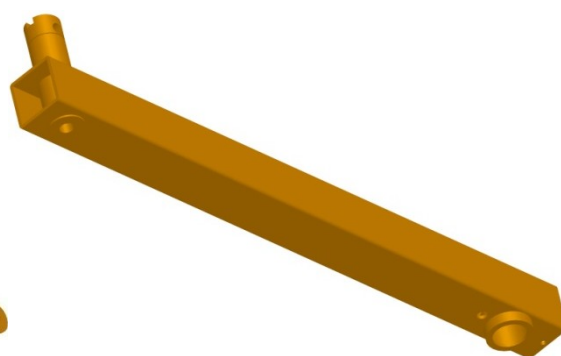
Obr.31 - Základna

6.4 Konstrukce ramen

Obě ramena (obr.32-33) jsou konstruována na podobném principu, pomocí svařených hliníkových profilů. Jedná se o samostatné díly, kde jejich hřídelové části jsou vloženy do ložisek a zajištěny pojistným kroužkem.



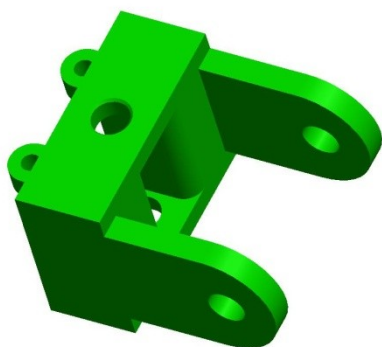
Obr.32 - *Rameno 2*



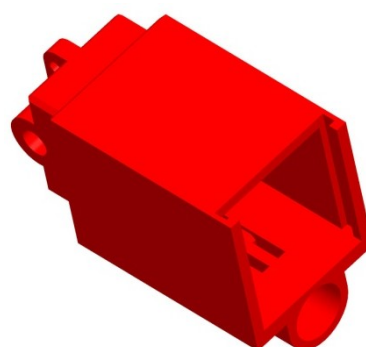
Obr.33 - *Rameno 1*

6.5 Pohyblivé držáky kamery, jistící sponka

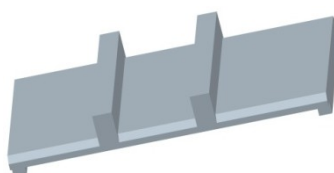
Tyto jednotlivé součásti držící a umožňující pohyb kamery jsou vyrobeny pomocí 3D tisku, kvůli jejich tvarové složitosti (obr.34 až 36). Použitým materiálem je plast ABS.



Obr.34 - *Držák 1*



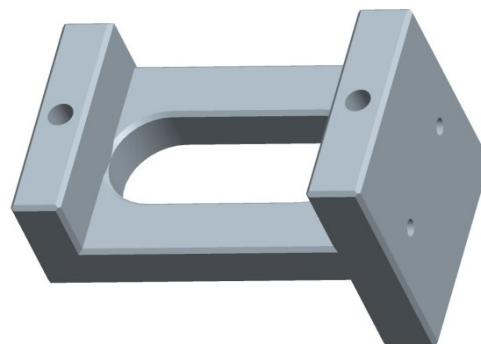
Obr.35 - *Držák 2*



Obr.36 - *Jistící sponka*

6.6 Držák serva

Držák serva (obr.37) je jednotlivou součástí, vyrobenou pomocí 3D tisku. Použitým materiálem je plast ABS. Držák se nachází na konci prvního ramene, kde pomáhá přichytit příslušné modelářské servo k rámu a to pomocí tří závitových děr pro šrouby. Součást slouží také k přichycení krytu, chránícího servo.



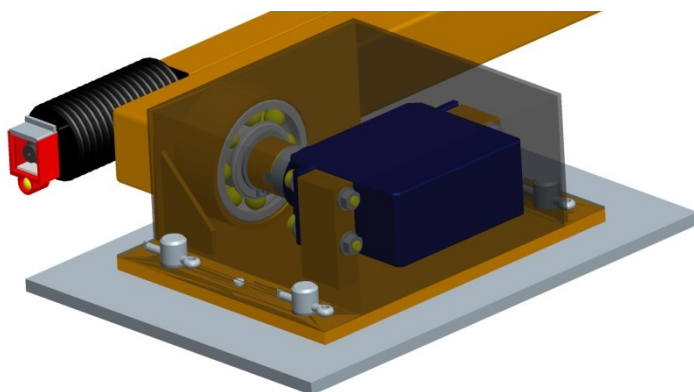
Obr.37 - Držák serva

6.7 Krytování serv

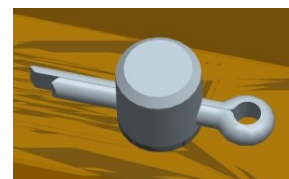
Všechna servo jsou opatřena krytem, který se vyrábí pomocí tenkých hliníkových plechů. Ty jsou tvořeny tak, aby dané krytování optimálně vyhovovalo příslušnému místu a možnosti jeho snadného uchycení pomocí šroubu a matic. Mezery vzniklé při montáži krytů je dobré opatřit izolačním tmelem k zabránění vniku vlhkosti a nečistot.

6.8 Upevnění subsystému

Celý mechanismus můžeme rychlým a pevným způsobem uchytit do předem připevněných čtyř čepů, jež odpovídají díram na základu subsystému. Poté jednoduchým vložením závlaček do těchto čepů zajistíme případné uvolnění (obr.38-39). Upevnění subsystému je možno řešit i jinými způsoby. Možnosti se mohou lišit v závislosti na daném místě ukotvení.



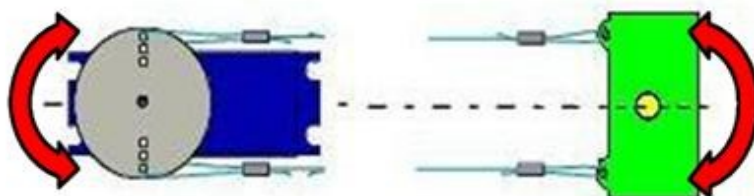
Obr.38 - Upevnění subsystému



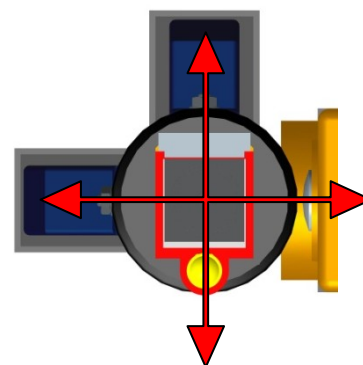
Obr.39 - Čep se závlačkou

6.9 Princip pohybu konce ramene s mikrokamerou

Mikrokamera se nachází na dvou pohyblivých kloubech, které jí dávají dva stupně volnosti. Tento pohyb umožňují dvě serva HS-50, jež jsou umístěna na opačném konci ramene. Serva a klouby jsou spojeny nerezovým lankem o průměru 0,5 mm. Tento mechanismus umožňuje natočení ve svislé ose o $\pm 60^\circ$ a ve vodorovné ose o $\pm 35^\circ$. Princip mechanismu viz obr.40 a 41.



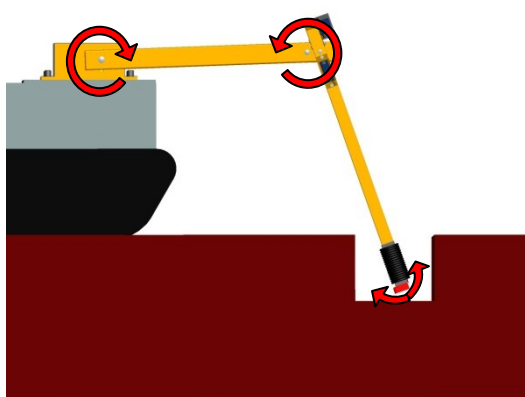
Obr.40 - Princip pohybu



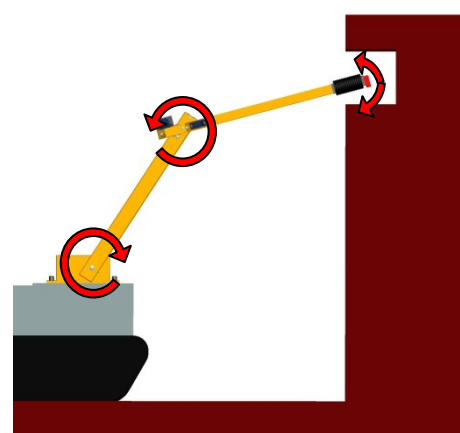
Obr.41 - Osy natáčení

6.10 Využití subsystému

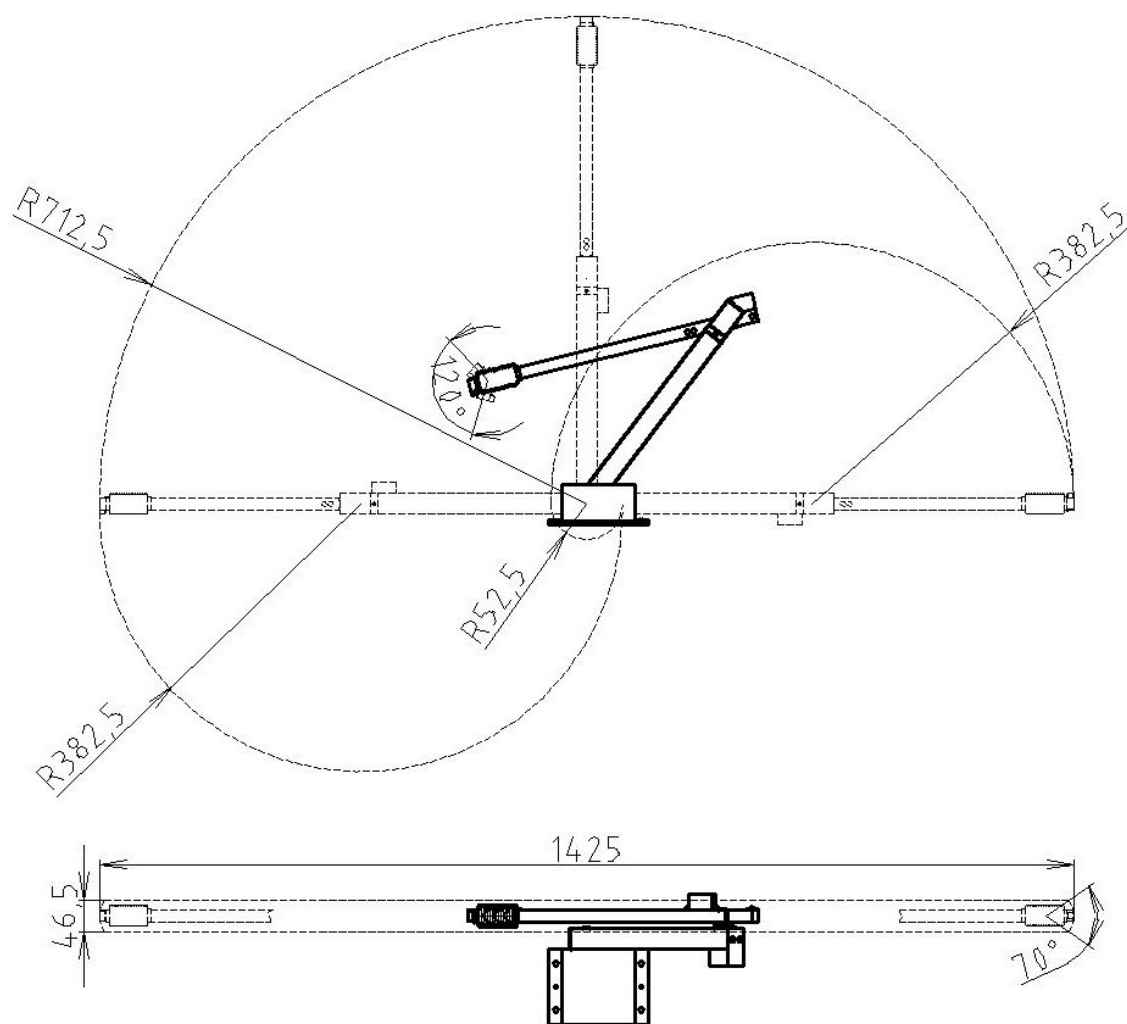
Celý subsystém slouží k prozkoumání těžko dostupných, polozavřených či zakrytých míst (obr.42-43). K tomuto účelu mu slouží dosah okolo 700mm a čtyři stupně volnosti. Modelářská serva umožňují natáčení o 180° , tím vymezují možnost pohybu koncového členu (obr.44). Subsystém je také opatřen diodou, umístěnou na konci posledního ramene.



Obr.42 - Průzkum 1



Obr.43 - Průzkum 2



Obr.44 - Dosahy koncového členu

7 Kontrolní výpočty hlavních konstrukčních uzlů

7.1 Kontrola ložisek

Je zvoleno dvojřadé kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem (viz. příloha 3) a jednořadá kuličková ložiska 61900 (viz. příloha 2). Pro takto zvolená ložiska byla provedena kontrola [17].

7.1.1 Ložisko SKF 3204 A

$$\text{Statická únostnost} \quad C_0 = 12500 [N] \quad [7.1]$$

$$\text{Dynamická únostnost} \quad C = 17800 [N] \quad [7.2]$$

$$\text{Otáčky} \quad n_{HS805} = 52,63 [ot \cdot min^{-1}] \quad [7.3]$$

$$\text{Hmotnost všech rotujících součástí} \quad m_v = 0,6 [kg] \quad [7.4]$$

$$\text{Exponent trvanlivost} \quad p = 3 [-] \quad [7.5]$$

Výpočet axiální části:

$$F_a = m \cdot g = 0,6 \cdot 9,81 = 5,886 [N] \quad [7.6]$$

Velikost radiální síly během provozu nejsme schopni zjistit jinak než experimentálně. Zvolím určitou kritickou hodnotu, která nebude při běhu přesáhnuta.

$$F_r = 100 [N] \quad [7.7]$$

Hodnoty s tabulky ložiska:

$$e = 0,8 [-] \quad [7.8]$$

$$Y_1 = 0,78 [-] \quad [7.9]$$

poměr $\frac{F_a}{F_r}$:

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{5,886}{100} = 0,059 [-] \quad [7.10]$$

$$\frac{F_a}{F_r} \leq 0,059 \leq e \rightarrow P = F_r + Y_1 \cdot F_a \quad [7.11]$$

$$P = 100 + 0,78 \cdot 5,886 = 104,6[N] \quad [7.12]$$

výpočet životnosti:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p = \left(\frac{17800}{104,6}\right)^3 = 4927934[10^6 \text{ot}] \quad [7.13]$$

$$L_{10h} = \left(\frac{10^6}{60 \cdot n_s}\right) \cdot L_{10} = \left(\frac{10^6}{60 \cdot 52,63}\right) \cdot 4927934 = 1,560 \cdot 10^9[h] \quad [7.14]$$

Ložisko je dosti předimenzováno, ale rozměrově pro konstrukci vhodné.

7.1.2 Ložisko SKF 61900

| | | |
|-------------------|----------------|--------|
| Statická únosnost | $C_0 = 850[N]$ | [7.15] |
|-------------------|----------------|--------|

| | | |
|--------------------|----------------|--------|
| Dynamická únosnost | $C = 2080 [N]$ | [7.16] |
|--------------------|----------------|--------|

| | | |
|--------|--|--------|
| Otáčky | $n_{HS5085} = 76,92 [\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}]$ | [7.17] |
|--------|--|--------|

| | | |
|------------------------------------|------------------|--------|
| Hmotnost všech rotujících součástí | $m_v = 0,2 [kg]$ | [7.18] |
|------------------------------------|------------------|--------|

| | | |
|----------------------|-------------|--------|
| Exponent trvanlivost | $p = 3 [-]$ | [7.19] |
|----------------------|-------------|--------|

Výpočet axiální části:

$$F_a = m \cdot g = 0,2 \cdot 9,81 = 1,962 [N] \quad [7.20]$$

Velikost radiální síly během provozu nejsme schopni zjistit jinak než experimentálně.

Zvolím určitou kritickou hodnotu, která nebude při běhu přesáhnuta.

$$F_r = 100 [N] \quad [7.21]$$

součinitel z poměru $\frac{F_a}{C_0}$

$$f_0 = \frac{F_a}{C_0} = \frac{1,962}{850} = 0,0023[-] \quad [7.22]$$

$$\text{nejbližší větší hodnota } f_0 = 0,172[-] \rightarrow e = 0,19[-] \quad [7.23]$$

poměr $\frac{F_a}{F_r}$:

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{1,962}{100} = 0,02[-] \quad [7.24]$$

$$\frac{F_a}{F_r} \leq 0,02 \leq e \rightarrow P = F_r \quad [7.25]$$

výpočet životnosti:

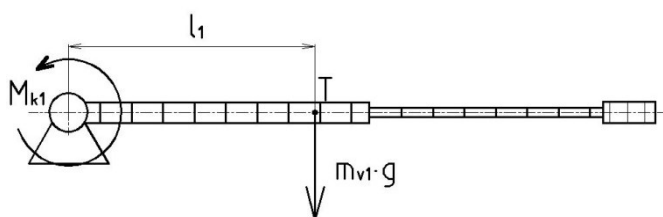
$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p = \left(\frac{2080}{100}\right)^3 = 8998,912[10^6 \text{ ot}] \quad [7.26]$$

$$L_{10h} = \left(\frac{10^6}{60 \cdot n_s}\right) \cdot L_{10} = \left(\frac{10^6}{60 \cdot 76,92}\right) \cdot 8998,912 = 1,950 \cdot 10^6[h] \quad [7.27]$$

Ložisko je dosti předimenzováno, ale rozměrově pro konstrukci vhodné.

7.2 Kontrola pohonu

7.2.1 Kontrola pohonu základu



Obr.45 - Schéma působících sil



Obr.46 - 3D model ProEngineer

Krouticí moment modelářského serva: $M_{HS805} = 2423[N \cdot mm] \quad [7.28]$

Hmotnost klopných ramen: $m_{v1} = 0,56[\text{kg}] \quad [7.29]$

Vzdálenost k těžišti: $l_1 = 0,282[\text{m}] \quad [7.30]$

Úhlová rychlost modelářského serva: $\omega_{HS805} = 5,511[\text{rad}/\text{s}^{-1}] \quad [7.31]$

Doba za kterou pohon dosáhne max. rychlosti: $t_{HS805} = 0,5[\text{s}]^* \quad [7.32]$

Moment setrvačnosti všech hmot konajících rotaci: $I_{r1} = 0,064582969[\text{kg} \cdot \text{m}^2]**[7.33]$

*tato hodnota byla zvolena intuitivně, z důvodu určení zrychlení modelářského serva. Zrychlení modelářského serva se neudává, dalo by se zjistit pouze experimentálně.

**hodnota na základě s ProEngineeru

výpočet zrychlení α_{HS805} :

$$\omega_{HS805} = \alpha_{HS805} \cdot t_{HS805} \rightarrow \alpha_{HS805} = \frac{\omega_{HS805}}{t_{HS805}} = \frac{5,511}{0,5} = 11,022[\text{rad/s}^{-2}] \quad [7.34]$$

výpočet celkového krouticího momentu M_{k1} :

$$M_{k1} = m_{v1} \cdot g \cdot l_1 + I_{r1} \cdot \alpha_{HS805} = 0,56 \cdot 9,81 \cdot 0,282 + 0,064582969 \cdot 11,022 = 2,261[\text{N} \cdot \text{m}] = 2261[\text{N} \cdot \text{mm}] \quad [7.35]$$

$$M_{k1} \leq M_{HS805}$$

Potřebný krouticí moment je nižší než moment vyvinutý modelářským servem. Pohyb subsystému je požadován malý, krouticí moment by se neměl zvyšovat. Modelářské servo vyhovuje.

7.2.2 Kontrola pohonu ramene

Krouticí moment modelářského serva: $M_{HS5085} = 422[\text{N} \cdot \text{mm}] \quad [7.36]$

Hmotnost klopného ramene: $m_{v2} = 0,187[\text{kg}] \quad [7.37]$

Vzdálenost k těžišti ramene: $l_2 = 0,132[\text{m}] \quad [7.38]$

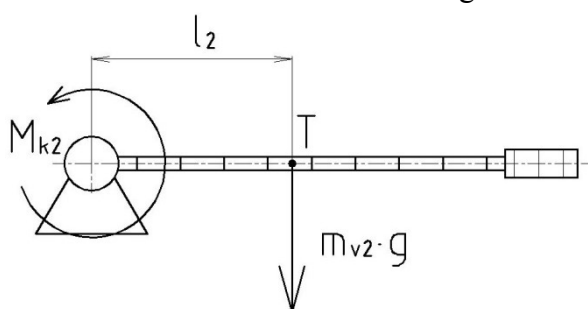
Úhlová rychlost modelářského serva: $\omega_{HS5085} = 8,055[\text{rad/s}^{-1}] \quad [7.39]$

Doba za kterou pohon dosáhne max. rychlosti: $t_{HS5085} = 0,5[\text{s}]^* \quad [7.40]$

Moment setrvačnosti všech hmot konající rotaci: $I_{r2} = 0,006946279[\text{kg} \cdot \text{m}^2]**[7.41]$

*tato hodnota byla zvolena intuitivně, z důvodu určení zrychlení modelářského serva. Zrychlení modelářského serva se neudává, dalo by se zjistit pouze experimentálně.

**hodnota na základě s ProEngineeru



Obr.47 - Schéma působících sil



Obr.48 - 3D model ProEngineer

výpočet zrychlení α_{HS5085} :

$$\omega_{HS5085} = \alpha_{HS5085} \cdot t_{HS5085} \rightarrow \alpha_{HS5085} = \frac{\omega_{HS5085}}{t_{HS5085}} = \frac{8,055}{0,5} = 16,11 \left[\frac{rad}{s^{-2}} \right] \quad [7.42]$$

výpočet celkového krouticího momentu M_{k2} :

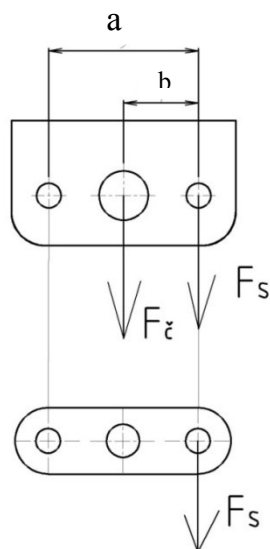
$$M_{k2} = m_{v2} \cdot g \cdot l_2 + I_{r2} \cdot \alpha_{HS5085} = 0,187 \cdot 9,81 \cdot 0,132 + 0,006946279 \cdot 16,11 = 0,354 [N \cdot m] = 354 [N \cdot mm] \quad [7.43]$$

$$M_{k2} \leq M_{HS5085}$$

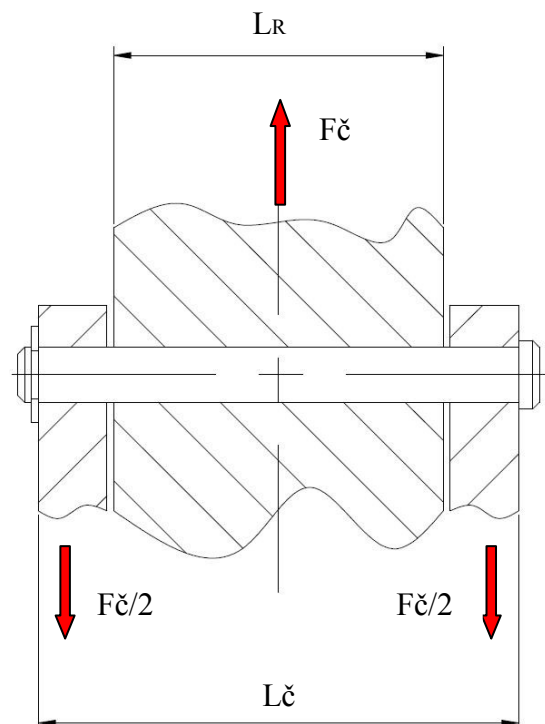
Potřebný krouticí moment je nižší než moment vyvinutý modelářským servem. Pohyb subsystému je požadován malý, krouticí moment by se neměl zvyšovat. Modelářské servo vyhovuje.

7.3 Kontrola čepu

Kontrola čepu je provedena pro nejhorší možný případ (zaseknutí mechanismu), který za normálních okolností nenastane.



Obr.49 – Rozložení sil



Obr.50– Síly působící na čep

Materiál čepu byl zvolen 11500.

$$\text{Mez kluzu v tahu [3]:} \quad R_e = 260[MPa] \quad [7.44]$$

$$\text{Dovolený měrný tlak [3]:} \quad p_D = 120[MPa] \quad [7.45]$$

$$\text{Koeficient bezpečnosti:} \quad k = 1,3[-] \quad [7.46]$$

$$\text{Průměr čepu:} \quad D_{\check{c}} = 3[mm] \quad [7.47]$$

$$\text{Síla serva na rameni } b: \quad F_s = 13,08[N] \quad [7.48]$$

$$\text{Velikost páky:} \quad a = 9[mm] \quad [7.49]$$

$$\text{Rameno páky:} \quad b = 4,5[mm] \quad [7.50]$$

$$\text{Velikost čepu:} \quad L_{\check{c}} = 18[mm] \quad [7.51]$$

$$\text{Velikost táhla:} \quad L_R = 13[mm] \quad [7.52]$$

Výpočet síly působící na čep $F_{\check{c}}$ (obr.49):

$$F_s \cdot a = F_{\check{c}} \cdot b \rightarrow 13,08 \cdot 9 = F_{\check{c}} \cdot 4,5 \rightarrow F_{\check{c}} = \frac{13,08 \cdot 9}{4,5} = 26,16[N] \quad [7.53]$$

Délka náboje ramene L_R musí vyhovovat podmínce pro měrný tlak (obr.50):

$$p_D \geq \frac{F_{\check{c}}}{L_R \cdot D_{\check{c}}} \rightarrow 120 \geq \frac{26,16}{13 \cdot 3} \rightarrow 120 \geq 0,67 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad [7.54]$$

Délka uložení čepu $\frac{L_{\check{c}} - L_R}{2}$ musí vyhovovat podmínce měrného tlaku ve vidlici (obr.50):

$$p_D \geq \frac{\frac{F_{\check{c}}}{2}}{\left(\frac{L_{\check{c}} - L_R}{2}\right) \cdot D_{\check{c}}} \rightarrow 120 \geq \frac{\frac{26,16}{2}}{\left(\frac{18 - 13}{2}\right) \cdot 3} \rightarrow 120 \geq 1,744 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad [7.55]$$

Dovolený měrný tlak je menší než působící. Navržený čep vyhovuje naší kontrole v obou případech.

7.4 Kontrola svarů

Je provedena kontrola koutového svaru hřídele s rámem ramene.[3]

Nosný průřez koutového svaru a:

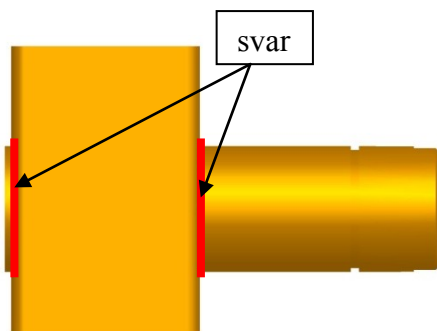
$$a \approx (0,5 \div 0,7)t$$

$$a = 0,5 \cdot 2 = 1 \text{ [mm]} \quad [7.56]$$

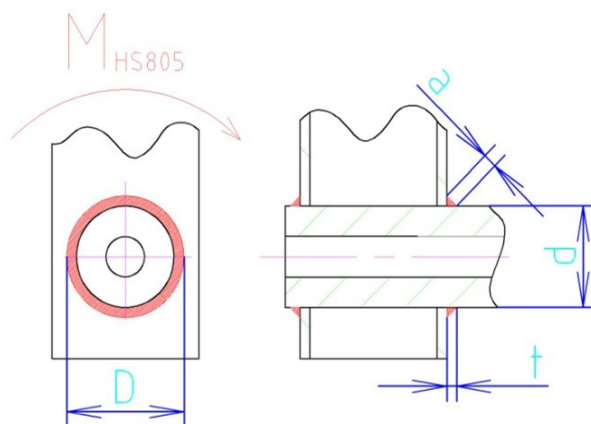
Výpočet průměru hřídele se svarem D:

$$D = 2 \cdot a + d \quad [7.57]$$

7.4.1 Kontrola svarů prvního ramene s hřídelí



Obr.51 -3D model se svary



Obr.52 - Svary

Průměr hřídele: $d = 20 \text{ [mm]} \quad [7.58]$

Průměr hřídele a svaru: $D = 22 \text{ [mm]} \quad [7.59]$

Dovolený tlak [3]: $\sigma_D = 60 \text{ [MPa]} \quad [7.60]$

Krouticí moment: $M_{HS805} = 2423 \text{ [N} \cdot \text{mm]} \quad [7.61]$

Kontrola koutového svaru na krut:

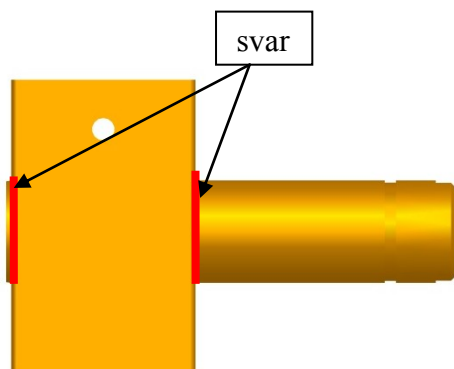
$$\tau_{Dsv} = 0,65 \cdot \sigma_D = 0,65 \cdot 60 = 39 \text{ [MPa]} \quad [7.62]$$

$$\tau_{II} = \frac{M_{HS805}}{W_{ksv}} = \frac{M_{HS805}}{2 \cdot \frac{\pi}{16} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D}} \leq \tau_{Dsv} \quad [7.63]$$

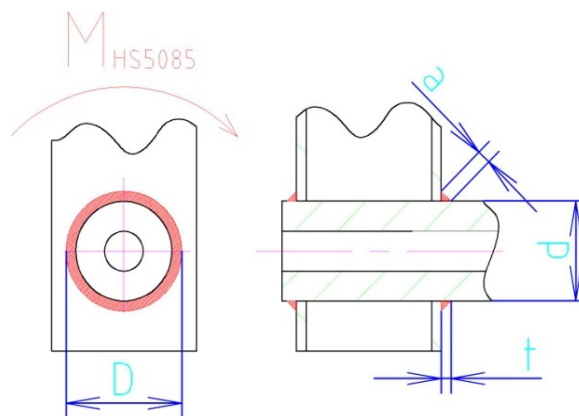
$$\tau_{II} = \frac{2423}{2 \cdot \frac{\pi}{16} \cdot \frac{22^4 - 20^4}{22}} = 1,829[MPa]$$

$$\tau_{II} \leq \tau_{D_{sv}} \rightarrow \text{vyhovuje} \quad [7.64]$$

7.4.2 Kontrola svarů druhého ramene s hřídelí



Obr.53 -3D model se svary



Obr.54 - Svary

Průměr hřídele: $d = 10[mm]$ [7.65]

Průměr hřídele a svaru: $D = 12[mm]$ [7.66]

Dovolený tlak [3]: $\sigma_D = 60[MPa]$ [7.67]

Krouticí moment: $M_{HS5085} = 422[N \cdot mm]$ [7.68]

Kontrola koutového svaru na krut:

$$\tau_{D_{sv}} = 0,65 \cdot \sigma_D = 0,65 \cdot 60 = 39[MPa] \quad [7.69]$$

$$\tau_{II} = \frac{M_{HS5085}}{W_{ksv}} = \frac{M_{HS5085}}{2 \cdot \frac{\pi}{16} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D}} \leq \tau_{D_{sv}} \quad [7.70]$$

$$\tau_{II} = \frac{422}{2 \cdot \frac{\pi}{16} \cdot \frac{12^4 - 10^4}{12}} = 1,202[MPa]$$

$$\tau_{II} \leq \tau_{D_{sv}} \rightarrow \text{vyhovuje} \quad [7.71]$$

Dovolený krut je menší než působící. Navržené svary dostatečně vyhovují.

8 Závěr

Cílem bakalářské práce byl konstrukční návrh s použitím mikrokamery. Na základě provedené analýzy a současného stavu použití mikrokamer a subsystémů se vytvořily konkrétní varianty řešení. Pomocí hodnotové analýzy byla vybrána optimální varianta, která se dále rozpracovávala.

Hlavní částí celého subsystému je jeho základna, která slouží jako kotvící element a dále dvě ramena umožňující potřebný dosah mechanismu. První rameno je vloženo do základny s ložiskem. Druhé rameno je vloženo do konce prvního ramene s dvěma kuličkovými ložisky. Obě tato ramena jsou spojena s pohony umožňující dva stupně volnosti. Mikrokamera se nachází na konci druhého ramene. Je opatřena dvěma klouby zajišťující další dva stupně volnosti. Celý tento subsystém má tudíž čtyři stupně volnosti k průzkumu hůře dostupných míst. K mikrokameře je také přidána led dioda k možnému přisvětlení.

Na ramenech subsystému jsou přimontovány pohony a kryty pomocí šroubů a matic, kvůli kterým bylo použito pomocných děr z důvodu snadnější montáže. Po montovacím procesu jsou příslušné otvory zakryty záslepkami. Všechny pohony jsou opatřeny kryty, zabezpečující jejich ochranu a zamezení vniku nečistot. Mezery vzniklé při montáži krytů jsou opatřeny izolačním tmelem, kterým opět zabráníme vniku nečistot a hlavně vlhkosti.

Je použit také 3D tisk pro vytvoření kloubů držáku kamery, jistící sponky, ramínek serv, spojek serv a držáků serva pro zachycení pohonu druhého ramene z důvodu odlehčení a složitosti součástek.

V práci je proveden návrh variant, výběr optimální varianty, její konstrukce a výpočty. Dále je potřeba dopracovat příslušnou elektroinstalaci a řízení příslušných pohonů.

9 Použitá literatura:

- [1] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory*. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [2] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty - pohony, senzory, řízení*. Praha 5 : BEN-technická literatura, 2005. 248 s. ISBN 80-7300-141-1.
- [3] LEINVEBER, Jan; VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. Praha 1, Biskupský dvůr 5 : ALBRA - pedagogické nakladatelství, 2003. 870 s. ISBN 80-86490-74-2.
- [4] KÁRNÍK, Ladislav. *Servisní roboty*. Ostrava : VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2004. 144 s. ISBN 80-248-0626-6.
- [5] SKAŘUPA, Jan. *Metodika konstruování*. 1.vydání. Ostrava : Vysoká škola báňská v Ostravě, 1993. 152 s. ISBN 80-7078-167-X.
- [6] <http://www.rcm-pelikan.cz/>
- [7] <http://http://vlastikd.webz.cz/bastl/serva.htm>
- [8] <http://www.escadtrade.cz>
- [9] <http://www.servocity.cz>
- [10] <http://www.ho-bra.cz>
- [11] <http://www.drawin.cz>
- [12] <http://www.ocrobotics.com>
- [13] <http://www.gepclinic.cz>
- [14] http://www.med.muni.cz/biofyz/doc/lecVUT/endoskopie_a_in vazivni_meto dy.ppt
- [15] <http://www.uamt.feec.vutbr.cz>
- [16] <http://www.solidcomponents.com/company/?SCCC=SCCZN11PX&Lang=46&VisualID=14146>
- [17] <http://www.skf.cz/>

- [18] <http://www.mpjet.com/>
- [19] <http://www.converter.cz/prevody/krounici-moment.htm>
- [20] <http://www.ges.cz/>
- [21] <http://www.europlast-beran.cz/>

10 Přílohy

- 1) Montážní postup
- 2) Katalogový list jednořadého kuličkového ložiska 61900 SKF
- 3) Katalogový list dvojřadých ložisek s kosoúhlým stykem 3204 SKF
- 4) Katalogový list záslepky série E
- 5) Katalogový list záslepky série B
- 6) MO-S691P barevná miniaturní kamera
- 7) Led dioda
- 8) Hliníkové profily
- 9) Princip a upevnění lanka
- 10) Výkresová dokumentace
- 11) Elektronická podoba bakalářské práce
 - Model optimální varianty
 - Výkresová dokumentace
 - Přílohy
 - Bakalářská práce

11 Seznam použitých obrázků

| | |
|--------------------------------------|----|
| Obr. 1: Miniaturní kamera | 10 |
| Obr. 2: Desková kamera | 11 |
| Obr. 3: Makovaná kamera se záznamem | 11 |
| Obr. 4: Skrytá kamera | 11 |
| Obr. 5: Speciální kamera | 12 |
| Obr. 6: MO-S691P | 12 |
| Obr. 7: Kapsle | 13 |
| Obr. 8: Endoskop | 13 |
| Obr. 9: Fibroskop | 14 |
| Obr. 10: Malé hadí rameno | 14 |
| Obr. 11: Orpheus | 15 |
| Obr. 12: Kinematické schéma 1 | 16 |
| Obr. 13: Varianta 1 | 16 |
| Obr. 14: Kinematické schéma 2 | 17 |
| Obr. 15: Varianta 2 | 17 |
| Obr. 16: Kinematické schéma 3 | 18 |
| Obr. 17: Varianta 3 | 18 |
| Obr. 18: Popis serva | 22 |
| Obr. 19: Blokové schéma | 23 |
| Obr. 20: Řízení | 24 |
| Obr. 21: Impulsy | 24 |
| Obr. 22: Servo HS-50 | 25 |
| Obr. 23: Servo HS-5085MG | 25 |
| Obr. 24: Servo HS-805MG | 25 |
| Obr. 25: Optimální varianta | 26 |
| Obr. 26: Řez optimální varianty | 26 |
| Obr. 27: Kloub ramene 1 | 29 |
| Obr. 28: Kloub ramene 2 | 29 |
| Obr. 29: Řez krytu a kloubu kamery 1 | 30 |
| Obr. 30: Řez krytu a kloubu kamery 2 | 30 |
| Obr. 31: Základna | 30 |
| Obr. 32: Rameno 2 | 31 |
| Obr. 33: Rameno 1 | 31 |
| Obr. 34: Držák 1 | 31 |
| Obr. 35: Držák 2 | 31 |
| Obr. 36: Jistící sponka | 31 |
| Obr. 37: Držák serva | 32 |
| Obr. 38: Upevnění subsystému | 32 |
| Obr. 39: Čep se závlačkou | 32 |
| Obr. 40: Princip pohybu | 33 |
| Obr. 41: Osy natáčení | 33 |
| Obr. 42: Průzkum 1 | 33 |
| Obr. 43: Průzkum 2 | 33 |
| Obr. 44: Dosah koncového členu | 34 |
| Obr. 45: Schéma působících sil | 37 |
| Obr. 46: 3D model ProEngineer | 37 |
| Obr. 47: Schéma působících sil | 38 |
| Obr. 48: 3D model ProEngineer | 38 |
| Obr. 49: Rozložení sil | 39 |
| Obr. 50: Síly působící na čep | 39 |

| | |
|----------------------------|----|
| Obr. 51: 3D model se svary | 41 |
| Obr. 52: Svary | 41 |
| Obr. 53: 3D model se svary | 42 |
| Obr. 54: Svary | 42 |

12 Seznam použitých tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1: Volba kritérií | 19 |
| Tabulka 2: Zhodnocení vybraných kritérií | 19 |
| Tabulka 3: Volba bodovací stupnice | 19 |
| Tabulka 4: Přiřazení faktoru významnosti | 20 |
| Tabulka 5: Obodování jednotlivých variant | 20 |
| Tabulka 6: Zhodnocení a výběr optimální varianty 1 | 20 |
| Tabulka 7: Zhodnocení a výběr optimální varianty 2 | 21 |
| Tabulka 8: Zhodnocení a výběr optimální varianty 3 | 21 |
| Tabulka 9: Zhodnocení | 21 |